

распределения температур в охлаждаемых лопатках показали, что, несмотря на имеющиеся отклонения температурного состояния от проектного, спроектированные лопатки обладают достаточными запасами прочности, определенными из условия обеспечения заданного ресурса.

Как следует из изложенного, спроектированная система охлаждения, в целом, работоспособна. В настоящее время в ЦНИОКР «Машпроект» планируется проведение цикла испытаний по более подробному изучению температурного состояния деталей и узлов двигателя. Предполагается также проведение опытных работ по повышению глубины охлаждения лопаточных аппаратов.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ДОВОДКИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ СТУПЕНИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД

Ивах А.Ф., Суворов С.Г.

ФГУП «Научно-производственное предприятие «Мотор», г. Уфа

Сокращение числа ступеней компрессора является одной из ведущих тенденций в двигателестроении, так как существенно снижает трудоёмкость и себестоимость изготовления двигателя. Малоступенчатая схема упрощает проблему согласования ступеней и дает возможность проводить более экономичную доводку на базе испытаний моделей. Широкохордные ступени с высокой окружной скоростью имеют удовлетворительную устойчивость к возбуждению автоколебаний по наиболее опасным низкочастотным формам, малочувствительны к возмущениям потока на входе, устойчивы к попаданию посторонних предметов.

Необходимость создания малоступенчатого вентилятора обусловила резкое увеличение окружной скорости рабочих лопаток: от 400...470 м/с – у вентиляторов предыдущего поколения – до 577 м/с. Ступень проектировалась на следующие расчетные параметры:

$$\pi^*_{ст} = 2,36; \eta^*_{ад ст} = 0,84; \lambda_{1a} = 0,632.$$

Сравнительно высокий коэффициент теоретического напора ступени $\bar{H}_T = 0,27$ в сочетании с умеренным коэффициентом расхода $\bar{C}_{1a} = 0,338$ дают относительно высокое значение отношения $\bar{H}_T / \bar{C}_{1a} = 0,9$, которое присуще классу высоконапорных ступеней. По сравнению с вентиляторами предыдущего поколения (РД-33, АЛ-31Ф) удельная работа, производимая одной ступенью, увеличена в ~2,6 раза, количество лопаток на вентиляторе в целом снижено в 2 раза. Но приблизительно на 12...16% выросла масса вентилятора (приведенная к одному расходу и $\pi^*_в$). Тем не менее, широкохордные высокоскоростные ком-

прессоры могут не уступать по весовым показателям, благодаря применению композитных материалов или новых технологий изготовления лопаток – увеличение хорд профилей позволяет применять такие решения.

Проектированию натурной ступени вентилятора предшествовали обширные исследования ряда модельных ступеней с высокими окружными скоростями, проведённые в ЦИАМ под руководством Ю.Н. Васильева с целью поиска оптимальных параметров лопаточных венцов и методологии профилирования. В частности, была спроектирована ступень, которая показала принципиальную возможность получения заявленных параметров.

На ней проверено положительное влияние регулирования входного направляющего аппарата на характеристику ступени: прикрытие хвостовика аппарата значительно смещает характеристику на меньшие расходы и повышает на 1...2% КПД. Постановка над рабочим колесом щелевого перепуска расширило диапазон устойчивой работы ступени почти в два раза при незначительном снижении КПД. Другая положительная особенность характеристик модельной ступени – плавное изменение КПД в зависимости от степени повышения давления на высокой частоте вращения, что ослабляет влияние положения рабочей линии на КПД вентилятора. На моделях проведены исследования вариантов исполнения щелевого перепуска, а также испытания с перераспределением нагрузки вдоль хорды рабочего колеса, определены потребные густоты, удлинения и углы отставания для рабочих колес с новым уровнем скоростей. В результате был сформирован облик проточной части, особенности профилирования лопаточных венцов и состав регулирования натурной ступени.

Облик ступени вентилятора

Ступень имеет регулируемый входной направляющий аппарат, сверхзвуковое рабочее колесо и дозвуковой направляющий аппарат. Поток на входе на расчетном режиме – осевой, на выходе имеется остаточная закрутка относительно оси 10° . Наружный корпус над рабочим колесом – цилиндрический, в направляющем аппарате начинается некоторое понижение корпуса для сокращения длины переходного канала между вентилятором и каскадом высокого давления. Входной направляющий аппарат выполнен с поворотной хвостовой частью. Выходной направляющий аппарат в первоначальном исполнении также имел поворотную хвостовую часть для обеспечения согласования со второй ступенью. Ступень имеет элемент пассивного регулирования – щелевой перепуск над рабочим колесом, который также повышает устойчивость к возникновению автоколебаний. Схема проточной части ступени представлена на рис. 1.

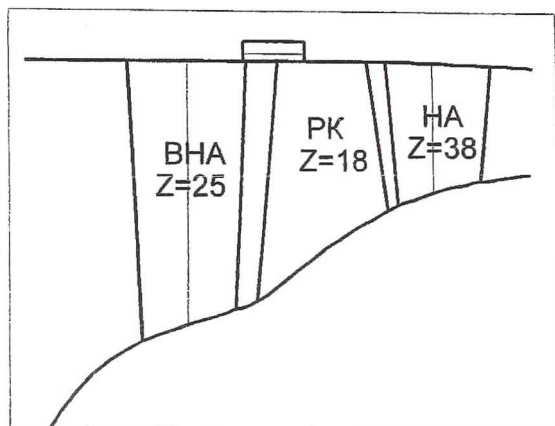


Рис.1. Схема проточной части ступени

ных венцов также имеет ряд особенностей. Степень повышения полного давления и КПД рабочего колеса заданы постоянными в ядре потока. На периферии и втулке принято некоторое снижение КПД, и увеличение $\pi^*_{РК}$. Средние величины: $\pi^*_{РК} = 2,456$, $\eta^*_{ад РК} = 0,880$. В направляющем аппарате – коэффициент изэнтропийности задан постоянным в ядре потока и снижен в пристеночной области. Угол выхода потока – постоянен по всей высоте.

На рис. 2 представлены некоторые расчетные параметры течения в ступени в зависимости от относительной площади сечения. Относительная безразмерная скорость потока на входе в периферийное сечение рабочего колеса достигает: $\lambda_{w1} = 1,56$, на втулке – $\lambda_{w1} = 0,90$, торможение относительной скорости составляет на периферии – 59%, на втулке – 35%. Угол поворота потока в направляющем аппарате достигает 40° , безразмерная скорость потока на втулке – превышает 0,9.

Профилирование ступени

Регулируемый входной направляющий аппарат состоит из неподвижной стойки и поворотного хвостовика, ось поворота делит лопатку практически на равные части. Угол поворота хвостовика изменяется в зависимости от приведенной частоты вращения в пределах от 0 до -30° . Число лопаток $Z_{ВНА} = 25$. В первоначальном исполнении парусность аппарата составляла 1,25, густота решетки значительно менялась по высоте.

Относительная толщина профиля выбрана, исходя из конструктивных и прочностных соображений: от 6,7 до 8,4%. Абсолютная толщина профиля по высоте постоянна. Средняя линия профиля – прямая, одета симметричным исходным профилем, со смещением максимальной толщины к носу лопатки.

Исходный аэродинамический расчет натурной ступени был выполнен по двумерной осесимметричной задаче методом «квазиортогоналей». В расчете принято линейное распределение вдоль осевой координаты нагрузки и потерь в лопаточных венцах.

Радиальное распределение расчетных параметров лопаточ-

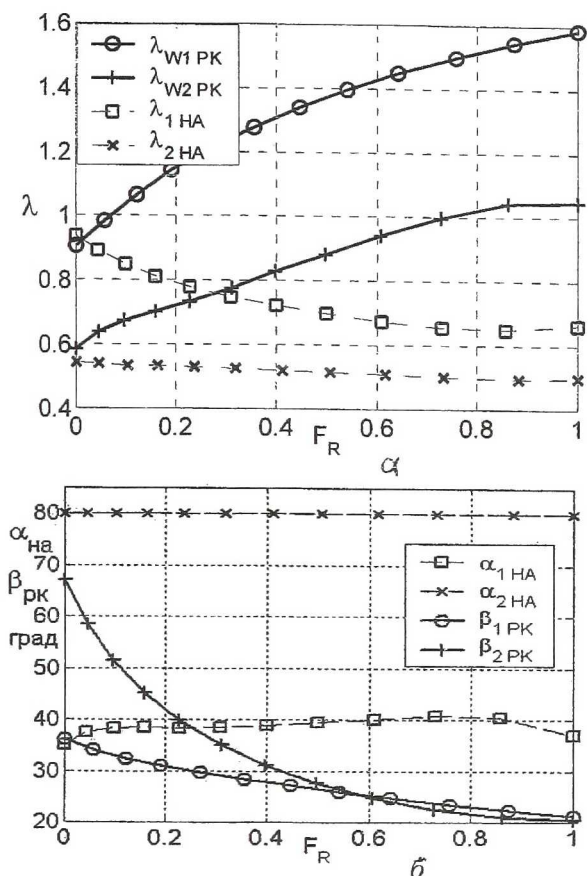


Рис.2. Расчетные параметры течения в ступени

лей или точки совмещения их на средней линии для заданного значения x . Далее выполняется свертывание разверток, заданных в полярной системе координат в конуса в декартовой системе. Число рабочих лопаток $Z_{PK} = 18$, удлинение — $(h_{вх}/b_{вт пл}) = 1,48$. Густота решетки на периферии $(b/t)_п = 1,50$. Парусность лопаток $(b_п/b_{вт ср}) = 1,27$. Относительная максимальная толщина профиля на периферии составляет 2,2%.

Направляющий аппарат в исходной компоновке был спрофилирован по плоским сечениям дозвуковым профилем. Число лопаток $Z_{HA} = 38$, удлинение — $(h_{вх}/b_{вт ср}) = 1,49$. Густота решетки на периферии $(b/t)_п = 1,74$. Парусность лопаток $(b_п/b_{вт}) = 1,24$. Относительная максимальная толщина меняется от 3,78% до 5%. Выполнено некоторое смещение максимального прогиба по потоку.

Рабочее колесо спрофилировано на конических поверхностях тока. При этом методе профилирование производится на развертках конических поверхностей, которые заменяют фактические поверхности тока, полученные при решении двумерной осесимметричной задачи. Известные из решения задачи кинематические

углы с учетом задаваемых углов атаки и отставания определяют конструктивные углы лопатки. По известным конструктивным углам на конических поверхностях определяются средние линии профилей. Средние линии одеваются «чечевицеобразным» профилем. На конических развертках определяются центры тяжести плоских профилей

Принятые при профилировании лопаток рабочего колеса и аппарата углы атаки показаны на рис. 3. «Настройка» решетки аппарата (отношение (A_r / A_i)) расположена в оптимальной области.

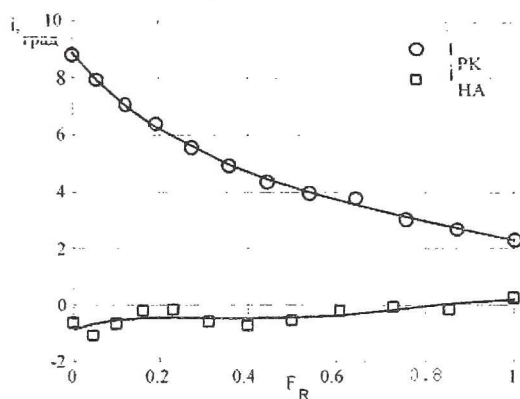


Рис. 3. Углы атаки лопаток

Доводка ступени

Натурная ступень вентилятора проходила экспериментальную доводку в составе вентилятора. Помимо определения интегральных характеристик, проводились измерения полей параметров потока по тракту, нестационарных процессов. Одновременно велись расчетные исследования — двумерные и трёхмерные расчёты течения с помощью поя-

вившихся в то время задач для невязкого газа.

Первое испытание показало, что расход воздуха вентилятора на расчетном режиме на 2,5% меньше расчетного, КПД — ниже на 5,5%. Так как именно первое рабочее колесо определяет расход на максимальном режиме, перед вторым испытанием рабочие лопатки были утонены по всей высоте в области максимальной толщины. На периферии максимальная толщина изменилась от $\bar{c}_{\max} = 2,2\%$ до $\bar{c}_{\max} = 1,5\%$. Также была повернута на раскрытие в 4° передняя неподвижная стойка направляющего аппарата, устранено перетекание воздуха по щелям между трактовыми полками рабочего колеса.

Второе испытание показало небольшое увеличение расхода воздуха и КПД на промежуточных режимах

Перед следующими испытаниями с лопаток были сняты тензодатчики, приблизительно на $\frac{1}{4}$ уменьшены радиальные зазоры над рабочими лопатками — до минимально возможных (с учетом применения истирающегося покрытия). В результате был получен прирост КПД — около 1,5...2,0% на промежуточных режимах и увеличение запаса устойчивости.

Для обеспечения одинакового по высоте угла закрутки потока за входным направляющим аппаратом была на 35% увеличена его парусность за счет изменения поворотного закрылка. Это уменьшило исходную разницу плотности на втулке и периферии решетки и, тем самым, сделало более равномерным распределение угла отставания по высоте.

В процессе доводки наиболее ощутимый эффект дали следующие

изменения первой ступени вентилятора:

- увеличение угла установки рабочих лопаток на $1,25^\circ$ за счет соответствующего разворота пазов в диске колеса;
- применение цельных нерегулируемых консольных лопаток направляющего аппарата. Лопатки были спрофилированы сверхзвуковым профилем на конических линиях тока, полученных в результате трехмерного расчета течения. Угол установки аппарата увеличен на $4,5^\circ$.

Увеличение угла установки рабочих лопаток дало существенный прирост расхода воздуха: на максимальном режиме получено превышение расчетного расхода на 2%. Консольный направляющий аппарат позволил получить около 1,5 – 2% прироста КПД.

Положительный эффект также приносили модификации и других лопаточных венцов вентилятора, их анализ нуждается в отдельном представлении.

Среди важных положительных мероприятий следует отметить существенный эффект от применения щелевого перепуска. Испытаниями установлено, что запас устойчивости по критерию ΔK_u в абсолютном выражении увеличился на величину около 20% при $\bar{n}_{np} < 0,9$, КПД – на 3%. На максимальном режиме произошло небольшое снижение КПД – около 0,8% и запаса устойчивости. Ряд испытаний проводился с измерением полей давления, температуры и углов потока по тракту вентилятора путем траверсирования проточной части миниатюрными комбинированными клиновидными насадками. Из результатов измерений (рис. 4) обра-

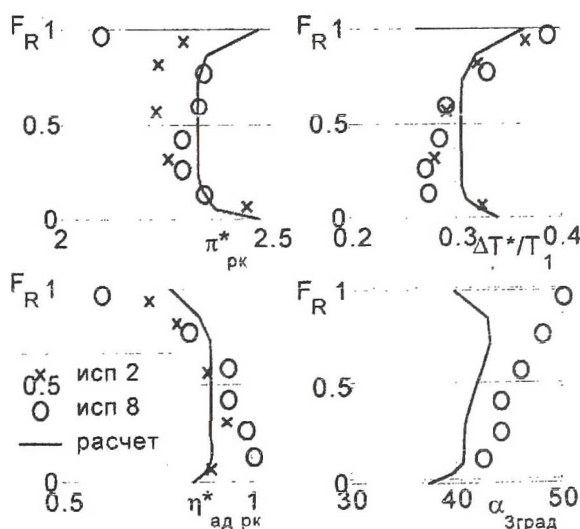


Рис. 4. Результаты измерений

ращает на себя внимание интенсивное падение КПД на периферии рабочего колеса на максимальном режиме до величин порядка 0,6, что свидетельствует о существенно нерасчетном течении в этой зоне. Расчет трехмерного невязкого течения (рис. 5) показывает, что в межлопаточных каналах периферийных сечений реализуется сильный замыкающий скачок уплотнения, интенсивность которого

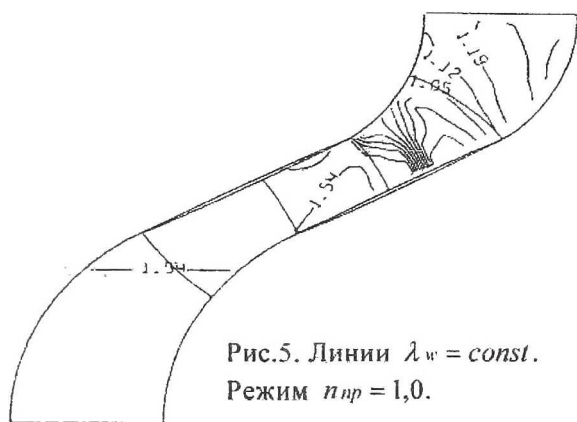


Рис.5. Линии $\lambda_w = const$.
Режим $n_{пр} = 1,0$.

достаточна для образования отрыва пограничного слоя, как на поверхности лопаток, так и на корпусе вентилятора.

Натурный вентилятор с рассматриваемой ступенью показал беспрецедентно низкий коэффициент чувствительности к возмущениям потока на входе

$$\alpha = \Delta K_y / W_{вх} = 0,15,$$

где $W_{вх} = (\Delta \bar{\sigma}_0 + \varepsilon)$ – уровень возмущений. Отмечена способность узла хорошо выравнивать входящие возмущения.

Комплекс доводочных работ позволил практически добиться получения основных параметров ступени. Впоследствии была изготовлена и испытана модельная ступень, идентичная натурной по геометрии рабочего колеса. Она показала параметры: $\pi^*_{ст} = 2,36$, $\eta^*_{ад ст} = 0,82$. На базе этой ступени были разработаны мероприятия по дальнейшему совершенствованию профилирования лопаток. Развитие в последние годы методов расчета с учетом вязкости газа открывает новые перспективы по проектированию высокоскоростных ступеней. Накопленный в ходе работ над ступенью вентилятора опыт представляет интерес, как для проектирования малоступенчатых компрессоров, так и для идентификации новых методик расчета.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ГТД

Лиманова Н.И., Ионе С.Д.

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

К информативным параметрам, позволяющим производить оценку стабильности рабочих процессов в двигателе непосредственно в процессе его эксплуатации, а также выполнять прогнозирование надежности ГТД, относятся пульсации давления, вибрации и температура нагрева элемен-